

高温空気燃焼プロセスにおける乱流拡散過程に関する研究

著者	諏訪 義和
号	2990
発行年	2002
URL	http://hdl.handle.net/10097/8262

	す わ よ し か ず
氏 名	諏 訪 義 和
授 与 学 位	博士 (工学)
学 位 授 与 年 月 日	平成 15 年 3 月 24 日
学 位 授 与 の 根 拠 法 規	学位規則第 4 条第 1 項
研究科, 専攻の名称	東北大学大学院工学研究科 (博士課程) 化学工学専攻
学 位 論 文 題 目	高温空気燃焼プロセスにおける乱流拡散過程に関する研究
指 導 教 官	東北大学教授 三浦 隆利
論 文 審 査 委 員	主査 東北大学教授 三浦 隆利 東北大学教授 猪股 宏 東北大学教授 阿尻 雅文

論 文 内 容 要 旨

産業革命以降、化石燃料の消費量は飛躍的に増大し、現在に至ってもその消費量は増加の一途を辿っている。また、産業革命以降の世界人口の増加、工業の発達、農業の発展につれて大気中の二酸化炭素濃度は著しく増加し、この二酸化炭素濃度の急速な増加は化石燃料の消費量に追随している。1980 年代後半から、二酸化炭素やメタン等の温室効果ガスの大気中濃度の増加による地球温暖化の深刻な問題が世界規模で取り沙汰されるようになった。また、地球温暖化問題の他にも環境汚染物質による大気汚染や環境汚染も世界的な社会問題となっている。特に NO_x が大気中に大量に排出されると、光化学スモッグや酸性雨、オゾン層の破壊などの深刻な環境破壊を引き起こし、大きな社会問題となっている。

近年、省エネルギー効果が非常に高い蓄熱燃焼技術として高温空気燃焼技術が開発され、省エネルギー化と NO_x 排出量の大幅な低減が同時に達成可能な燃焼技術として注目を集めている。この高温空気燃焼を化石燃料消費量の多い各種工業炉へ適量することにより、30%以上の省エネルギー化、50%以上の NO_x 排出量削減が達成可能であるとされており、高温空気燃焼を適用した高性能工業炉の普及を促進することは、エネルギー・環境政策上、極めて重要なことである。

高温空気燃焼を適用した高性能工業炉の実用化および普及にあたって、高温空気燃焼における燃焼特性および伝熱特性を詳細に把握する必要がある。高温空気燃焼炉の更なる高性能化を目指すにあたって重要となる課題として、高温空気燃焼における低 NO_x 燃焼メカニズムの解明、炉内において支配的な伝熱機構となる高温空気燃焼におけるふく射伝熱特性の解明、高温空気燃焼における燃焼限界特性の把握といったことが挙げられる。また、高温空気燃焼を適用した高性能工業炉の普及にあたっての課題として、炉内温度分布の制御と加熱効率の向上に重要な火炎特性を支配する流速、乱れ、温度等の因子による影響の把握、交番燃焼における炉内火炎の特性に関する予測技術の確立などが挙げられる。そこで

本論文では、高温空気燃焼における火炎特性の予測・把握技術の確立を目的として、高温空気燃焼における伝熱特性および燃焼特性について数値解析的に検討を行った。

第 1 章では、本論文の緒論として、高温空気燃焼技術および高精度な炉内温度予測や伝熱予測を行う上で重要となるふく射伝熱モデルの既往の研究例について示す。

第 2 章では高温空気燃焼炉の高効率操業方法の指針となる伝熱特性予測技術の確立および数値解析技術の工業的ツールとしての応用を目的として、高温空気燃焼を適用したアルミニウム溶解炉の数値解析を非定常的に行い、その伝熱特性および燃焼特性について検討を行った。本章では燃焼形態の異なる 2 種類のバーナを用いた燃焼解析を行い、その溶解時間について比較検討を行うことで、高温空気燃焼炉の高効率操業方法について検討を行った。また、工業的ツールとして数値解析手法を応用するにあたって、高精度な解析結果が短時間で得られることが重要となる。炉の開発および設計を行う場合に数多くのケーススタディを行うこととなるが、計算時間が短時間であることは、開発コストおよび開発時間を低く抑える上で非常に重要な因子となる。本章では、高温空気燃焼における伝熱計算手法の高速化についても検討を行った。

高温空気燃焼を適用したアルミニウム溶解炉における溶解時間短縮化を検討するにあたって、燃焼形態の異なる 2 種類のバーナを用いて解析を行った。本研究でもちいたバーナは、高温空気燃焼で広く用いられている FDI タイプのバーナと、通常の拡散燃焼で用いられている同軸二重管型のバーナである。この 2 種類のバーナを用いて計算を行った結果、バーナ切り替え操作に伴いアルミニウムの最高温度が単調には増加せず、アルミニウムの最高温度と最低温度との差が大きく広がらないことが示された。また、それぞれの溶解時間を比較すると FDI タイプのバーナによる加熱の方が約 4% 加熱効率が優れていることが示された (Figure 1)。

アルミニウムが受熱する熱流束の時間変化の解析結果からは、対流熱流束はバーナ切り替え直後に大きく変動するものの、その大きく変動する時間はバーナ切り替えから 4 秒程度であり、バーナ切り替え操作に伴う炉内移動現象の変動は短時間で収まることが分かった。また、対流熱流束が大きく変動することに対し、ふく射熱流束の変動は小さく、壁面からのふく射の影響が強いことが分かった。

本解析手法の工業的ツールの発展には計算精度を維持して計算時間を短縮することが重要であり、次の様な着目から高温空気燃焼の伝熱解析手法の高速化を提案した。これまでの解析結果より、高温空気燃焼における均一加熱性の重要な要因は、バーナ切り替え操作に伴い火炎の位置が変化することであると考え、被加熱材からみた火炎の位置を変化させることでバーナ切り替え操作を模擬できるものと考え

た。そこで、燃焼用のバーナは切り替えずに、被加熱材であるアルミニウムを反転させることで被加熱材からみた火炎の位置を変化させ、擬似的にバーナ切り替え操作のモデル化を行った。この擬似的なバーナ切り替え操作による計算結果と、通常のバーナ切り替え操作による計算結果の比較から、両者の溶解時間は良好に一致し、本モデル化によって計算精度が低下することがないことが示された。このことより、均一加熱性の重要な要因はバーナ切り替え操作に伴う火炎の位置の変化にあるという考察の妥当性が示された。また、このときの実際に計算機が計算を行った時間を比較すると約 50% の計算時間の短縮化を達成することができ、高温空気燃焼を適用した高性能工業炉の最適設計を行う上で、非常に有効な計算手法を提示することができた。

第 3 章では高温空気燃焼炉内における炉内温度予測技術の確立および交番燃焼による火炎特性の把握を目的として、高温空気燃焼の燃焼解析に非灰色ふく射伝熱モデルを適用し、非定常解析を実施することにより、高温空気燃焼の燃焼特性の把握と非灰色モデルの妥当性について検討を行った。すす発生が殆んど無い高温空気燃焼では燃焼ガスのふく射物性を高精度に予測することが重要と考えられるため、本章ではふく射性ガスの波長依存性を考慮した非灰色モデルを用いて解析を行うことで、数値解析による炉内温度分布の高精度な予測技術の確立を図った。また非定常燃焼計算を実施することにより、実験的には観察が困難であったバーナ切り替え後における炉内の温度場や濃度場等の変動の定量的把握を行った。

高温空気燃焼の燃焼解析における非灰色ふく射伝熱解析手法の妥当性を検討するにあたり、燃焼ガスのふく射物性を灰色体として扱った場合と非灰色体として扱った場合について計算を行い、解析結果と Hasegawa *et al.* による測定結果との比較を行った。その結果、灰色ふく射伝熱解析法を適用した計算では火炎からのふく射による熱損失を過剰に評価し、火炎温度を低く見積もることが示された (Figure 2)。一方、非灰色ふく射伝熱解析法を適用した計算は測定結果との比較において良好に一致することが示され、本燃焼解析手法の妥当性および重要性が示された。非灰色ふく射伝熱解析法を適用した高温空気燃焼の燃焼解析の重要性が示されたが、本解析における計算時間を比較すると、非灰色ふく射伝熱解析法を適用した計算は灰色ふく射伝熱解析法を適用した計算の約 25 倍の計算時間を要した。しかしながら、非灰色ふく射伝熱解析法を適用した燃焼解析は従来の計算手法よりも高精度な予測が可能であり、計算時間、計算コストの問題を差し引いても有意義な計算結果を得ることが可能である。また、計算時間の問題は計算機能力の発達や並列計算を行うことで克服することが可能である。

高温空気燃焼の特徴であるリジェネレイティブバーナによるハイサイクル交番式燃焼では、燃焼用バ

バーナの切り替えに伴い炉内移動現象が変動する。これを実験による計測で定量的に把握することは困難であるため、非定常燃焼計算を行うことで数値解析的に定量的把握を行った。解析結果よりバーナ切り替え後に炉内の温度場や流れ場等が大きく変動する様子を確認することができた。また、本解析対象ではバーナ切り替えから 4, 5 秒程度の短時間で炉内の変動は安定し、その後は定常的な状態となることが示され、バーナ切り替えに伴う炉内の変動を定量的に把握することができた。

第 4 章では高温空気燃焼における低 NO_x 燃焼メカニズムの解明および高精度 NO_x 生成予測技術の確立を目的として、ふく射伝熱が NO_x 生成に及ぼす影響について検討を行った。NO_x 生成予測を行う上で火炎温度の高精度な予測が重要となるが、従来までの研究例では、燃料ガス種のふく射物性は透明体として扱われてきた。高温空気燃焼では従来までの拡散燃焼と異なり燃料ガスが低酸素濃度場に広範囲に拡散するため、燃料ガス種のふく射物性を考慮することにより、高精度な NO_x 生成予測が可能になると考えられる。また、NO_x 生成予測の高精度化は高温空気燃焼における低 NO_x 燃焼メカニズムの解明に大きく貢献するものである。

高温空気燃焼では同軸噴流拡散火炎よりも燃料ガスが広範囲に拡散する。そこで本研究では、これまで注目されてこなかった燃料化学種のふく射物性に着目し、メタンのふく射物性を比較的簡単に評価可能な Exponential Wide-Band モデルを用いて非灰色的に解析を行った。計算結果を比較から、メタンのふく射物性を考慮しない場合はメタンのふく射物性を考慮した場合よりも火炎温度を高く見積もることが示された (Figure 3)。そして、NO 生成量を比較するとメタンのふく射物性を考慮しない場合は、本解析対象では出口における NO 生成量を 10% 程度過剰に見積もることが分かった。メタンのふく射物性を考慮しない場合は、メタンは透明体として扱われる。そのため火炎からのふく射を吸収することとは無く、ふく射エネルギーがメタンの加熱に使われることが無いため、ふく射による熱損失を過小評価し、火炎温度を過剰に見積もることになる。そして、火炎温度を過剰に見積もることは NO 生成速度を過剰に見積もることとなり、NO 生成量を過大に評価することとなる。以上より、燃料ガス種のふく射物性の考慮の有無により NO 生成予測量が大きな影響を受けることが示された。

また、Hasegawa *et al.* による測定結果との比較において、メタンのふく射物性を考慮した計算結果の方がメタンのふく射物性を考慮しない計算結果よりも良好な一致を示すことが分かった。このことより、燃料ガス種のふく射物性を考慮することにより燃焼解析における NO 生成予測の高精度化を行うことができることが示された。

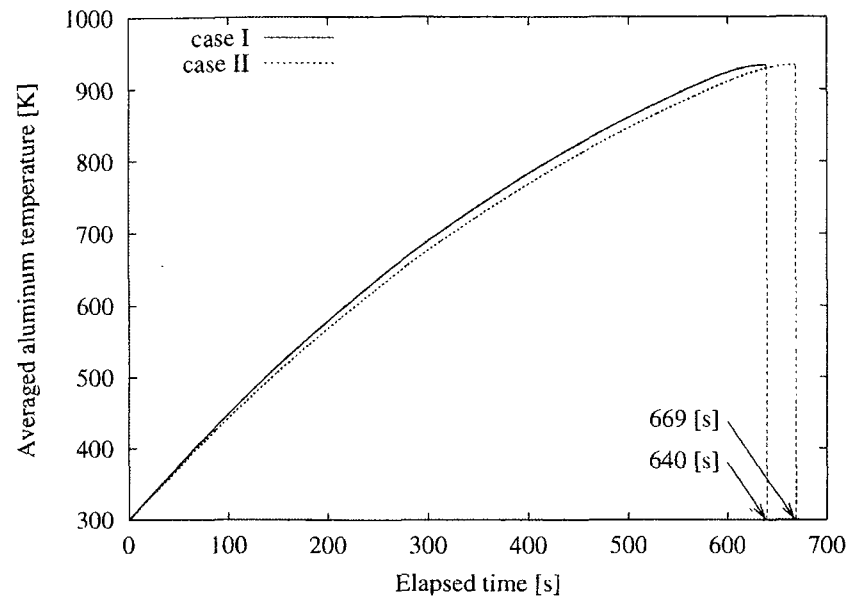
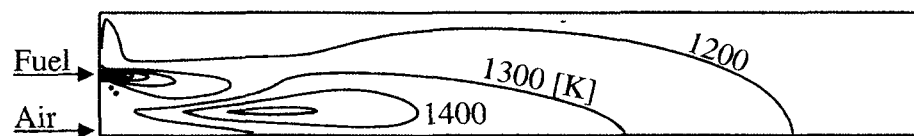
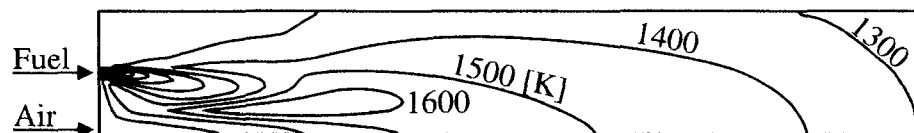


Figure 1 Comparison of averaged aluminum temperature

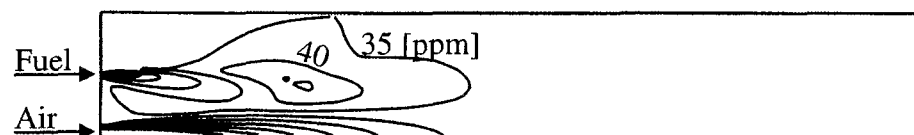


(a) Weighted-sum-of-gray-gases model

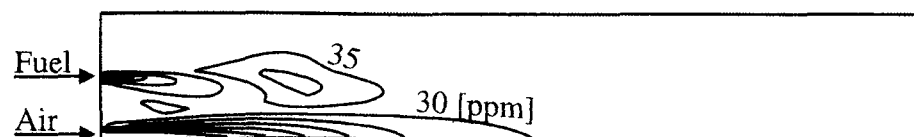


(b) Exponential wide-band model

Figure 2 Comparison of temperature distributions



(a) without CH4 radiative property



(b) with CH4 radiative property

Figure 3 Distributions of NO concentration

論文審査結果の要旨

高温空気燃焼は地球温暖化問題および環境汚染問題の原因となる二酸化炭素および窒素酸化物の排出量を大きく削減可能な燃焼技術である。本研究は、この高温空気燃焼を適用した工業炉の高性能化にあたって、高温空気燃焼における火炎特性の予測・把握技術の確立を目的とし、高温空気燃焼における伝熱特性および燃焼特性について数値解析的に解明したもので、全5章からなる。

第1章では、本論文の緒論として、本研究の背景、目的、既往の研究例について示している。

第2章では、高温空気燃焼炉の高効率操業方法の指針となり得る伝熱特性予測技術の確立および数値解積技術の工業的ツールとしての応用を目的として、高温空気燃焼を適用したアルミニウム溶解炉における3次元非定常燃焼解析コードを開発し、従来型バーナよりも高温空気燃焼で広く用いられているFDI型バーナによる加熱が省エネルギー化および二酸化炭素排出量削減の点で優れていることを示した。また、実験的には定量的観測が困難なバーナ切り替え後における炉内移動現象の変動を定量的に明らかにし、数値計算上では非加熱材だけを反転させることで計算精度を低下させることなく、かつ計算時間を大幅に短縮可能なバーナ切り替え操作のモデル化に成功した。

第3章では、高温空気燃焼炉内における炉内温度予測技術の確立および交番燃焼による火炎特性の把握を目的とし、非灰色ふく射伝熱解析法を適用した3次元非定常燃焼解析を行い、Hasegawaら(1997)の実験地との比較において、従来型の灰色ふく射伝熱解析法を適用した計算では解析精度が不十分であり、高温空気燃焼炉の解析における非灰色ふく射伝熱解析法の重要性を示した。

第4章では、高温空気燃焼における低 NO_x 燃焼メカニズムの解明および高精度 NO_x 生成予測手法の確立を目的として、ふく射伝熱が NO_x 生成に及ぼす影響について、3次元燃焼解析により検討を行った。これまでの燃焼計算では透明体として扱われてきたふく射性ガスのメタンのふく射物性をExponential Wide-Bandモデルを用いて評価を行い、メタンのふく射物性を無視した場合はメタンのふく射物性を考慮した場合よりも NO 生成量を過剰に見積もることを示した。また、メタンのふく射物性を考慮した計算は、Hasegawaら(1997)の測定結果との比較において良好な一致を示し、高精度 NO_x 生成予測を行う上で、燃料ガス種のふく射物性を考慮することの重要性を示した。

第5章は結論であり、研究全体の総括を行っている。

以上要するに本論文は、高温空気燃焼炉内における火炎特性の予測・把握技術の確立のために有用な数値解析手法を提示し、高温空気燃焼炉の設計に関する有益な指針を得たもので、伝熱工学および燃焼工学の発展に寄与するところが少なくない。

よって、本論文は博士(工学)の学位論文として合格と認める。